

令和 5 年 4 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01839

研究課題名（和文）非線形光学に基づくスケーラブル光量子情報処理の基盤確立

研究課題名（英文）Fundamental technologies for scalable photonic quantum information processing based on nonlinear optics

研究代表者

生田 力三（Ikuta, Rikizo）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号：90626475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：光子間の非線形相互作用は光量子情報処理にとって有用であるがその相互作用は極めて小さい。非線形性の増強は光共振器により可能であるが、共振器には許容する光の帯域を著しく制限する効果もあるため、用途毎に光共振器を適切に設計することが重要である。本研究では、2次の非線形光学において関与する光のうちの1本のみを閉じ込める独自構成の単共鳴型非線形光学を用いた新奇な量子制御技術を探求した。従来より遥かに大規模な周波数多重度をもつ偏光エンタングル光子対の生成と配送、周波数軸上の任意サイトを精密操作する光周波数ピンセットの実証、量子周波数コムを用いた量子計算の提案など、大規模光量子情報処理の基盤技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、異なる周波数モードの重ね合わせである量子周波数コムの生成や制御技術の開拓を行った。周波数自由度が、人類が最も精密に測定できる物理量であること、大規模ヒルベルト空間へ展開できること、既存の光周波数多重技術と親和性が高いこと、など潜在的に多数のメリットをもつことは知られていたが、本研究で実証した大規模な量子周波数コムの生成・配送や周波数ピンセットといった精密周波数制御の開発はこうしたメリットを活かした光量子情報処理の可能性を後押しするものであり、大規模化に向けた基盤技術となる。また、実験に用いた単共鳴型非線形光学は様々な用途に用いることができ、さらなる新奇量子制御への発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Nonlinear interactions among photons are useful for photonic quantum information processing, but the strength of these interactions is small. Enhancement of the nonlinearity is achieved by optical cavities. It is important to design an appropriate cavity for each application, since cavities have the effect of severely limiting the bandwidth of nonlinearity. In this study, we explore quantum manipulation of photons using an atypical singly resonant nonlinear optics that confines only one of the light involved in nonlinear interaction. We have established fundamental technologies for large-scale photonic quantum information processing, including the generation and distribution of polarization-entangled photon pairs with much larger frequency multiplicity than previously reported, demonstration of optical frequency tweezers for precise manipulation of arbitrary sites on the frequency domain, and proposal of quantum computation using quantum frequency combs.

研究分野：量子情報処理

キーワード：量子情報 量子インターネット 量子周波数コム 量子周波数変換 非線形光学 導波路共振器 波長  
分割多重 光量子演算

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光子間の非線形相互作用は極めて小さいため、現状の光量子回路における非線形量子操作は線形光学回路を大量の補助光子や事後選択操作と組み合わせられており、確率的動作が前提の設計となっている。しかし、量子コンピュータやそれらを繋ぐ大規模量子ネットワーク実現のためにはこの現状を打破し非線形光学を巧みに使いこなす必要がある。非線形光学増強に効果的なのは光共振器を利用することであるが、共振器には許容する光の帯域を著しく制限する効果や入出力に対して新たな損失を導入する可能性などがあるため、内部の非線形性が増強されたからと言って必ずしもシステム全体としての効率が向上するとは限らないという問題がある。そのため、単純に全ての光を閉じ込めて高い非線形性のみを追求することが最善であるとは限らず、状況に応じた適切な共振器配置を検討する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、用途毎に光共振器を適切に設計することで、高効率かつ新奇な非線形量子操作・制御技術の実現を目的とする。特に、共振器により増強された非常に強い 2 次の非線形光学効果を用いることで、光量子状態準備と非線形量子操作に対する成功確率を飛躍的に向上させる新奇な光量子操作を提案・実証する。非線形光学は周波数が異なる光子間の相互作用であるため、本研究は光周波数軸上の大自由度量子操作への展開が期待できる。周波数は最も正確に測定できる物理量であると共に成熟した既存の光通信技術とも相性が良い。これら技術を取り入れることで高集積かつ高精度なスケラブル光量子情報処理の基盤技術を確立する。

### 3. 研究の方法

量子情報では、非線形光学素子への入力にはレーザー光だけでなく様々な帯域の単一光子が想定されるため、目的に応じて閉じ込める光波長を柔軟に設計する必要がある。例えばリング型やディスク型の微小共振器系では関与する全ての光が共鳴する構成以外あり得ない。そのため本研究では、ファブリーペロー型の共振器構造を採用することにより目的に応じた共振器構造を形成することを考える。

2 次の非線形光学結晶には、実績が多数ある導波路型ニオブ酸リチウム (PPLN) を用いる。導波路両端を鏡面研磨し誘電体多層膜コーティングした一体型の非線形導波路共振器を形成することで、強い閉じ込めを実現する。本デバイスは、関与する光は周波数  $1, 2, 3 (= 1 + 2)$  の 3 本だけの光であるにも関わらず、その入力構成 (真空、光子、古典光) と共振器構造を切り変えるだけで (1) 周波数分離された SPDC 光子対生成、(2) 高効率コヒーレント波長変換、(3) 周波数領域に対する量子操作、など実に豊かな現象を生み出すことができる。

### 4. 研究成果

(1) 自発的パラメトリック下方変換 (SPDC) において、シグナルのみに共振器閉じ込めを行いアイドラおよび励起光に無反射コートをした単共鳴型 PPLN 導波路を用いると、非常に大規模な周波数多重光子対を生成できる。単なる古典的な混合状態ではなく異なる周波数モードが決まった位相関係を持っており重ね合わせ状態になっている。こうした状態は量子周波数コムと呼ばれ、2 光子からなるコムの場合は 2 光子周波数コムなどと呼ばれる。本研究では、この光源をサニャック干渉計と組み合わせることで偏光エンタングルメントを 2 光子周波数コムにのせ、これによって 1000 モード以上に大規模周波数多重化された偏光エンタングル光子対源の実現に成功した。最初の実験は共振器の FSR が 3.5GHz であったが、周波数多重化光子配送に向けて、FSR が 12.5GHz となるように PPLN の長さを新たに再設計・製作し、これを用いて 16 チャンネルの多重配送実験を行った。いずれの忠実度も 0.9 程度であり、確かに高いエンタングルメントを配送できた。

2 光子周波数コムの片方の光子を高時間分解測定すると、もう一方の単一光子が量子周波数コムとなる。多重共鳴の光源と異なり、一方の光子にはもともと共鳴構造がないため、離調をつけた励起光を 2 本入れて同様の操作を行うと、異なる周波数オフセットをもつ量子周波数コムの重ね合わせ状態が形成される。これを量子ビットとみなした時の線形光学量子演算についての理論解析をおこなった。その結果、これまで世界で得られている最高レベルの実験結果を適用することでエラー確率 1% を下回る量子計算が可能であることがわかった。

(2) 通常共振器増強をおこなった周波数変換では、通常、入出力光の帯域が制限されてしまう。そこで、本研究では励起光のみを閉じ込めた周波数変換器を実現した。これにより、単一光子などの量子光を想定した入出力の帯域に一切の制限を新たに加えることなく、高効率な周波数変換を実現した。周波数変換はラビ振動に類似する振る舞いであるため、励起パワーに対して変換と再変換を繰り返す。入力光が変換ののちに再変換されて元の周波数にかえってくるとき、幾何学的位相が付随する。PPLN は垂直偏光にしか応答しない配置であったため、たとえば右回り円偏光の入力光が再変換されると左回り円偏光になって出力される。偏光と周波数の自由度

にまたがった 1 光子 2 量子ビットの符号化に対してこれは制御位相ゲートを実行したことに対応している。

(3) 周波数変換において、(2)とは異なり、今度は変換光のみ閉じ込めた配置で信号光と励起光を入力することを考える。このとき、周波数変換で生じるべき変換光周波数は、信号光と励起光により決定されるが、これが共鳴周波数と一致する時、たしかに周波数変換が生じる。一方、これが共鳴から十分遠くにあるとき非線形光学が抑制され、その結果周波数は変換されず、信号光は非線形光学素子を素通りすることになる。これを少し発展させ、信号光が量子周波数コムであった場合、うまくコム間隔と共振器の FSR を設計することで、任意のスペクトルのみをコムから抽出し変換することができる。また、入力コムを、周波数オフセットが異なる複数のコムとみなすと、特定のコムのみを抽出することも可能である。このように、この変換は、様々な周波数成分に配置された光子に対して特定の配置のみにアクセスし精密制御できる。3次元空間に配置された物体に対して精密制御を行う光ピンセットになぞらえ、本過程を光周波数ピンセットと呼び、これを実証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Yamazaki Tomohiro, Ikuta Rikizo, Kobayashi Toshiki, Miki Shigehito, China Fumihito, Terai Hirotaka, Imoto Nobuyuki, Yamamoto Takashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Massive-mode polarization entangled biphoton frequency comb	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8964
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-12691-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Fujimoto Rintaro, Yamazaki Tomohiro, Kobayashi Toshiki, Miki Shigehito, China Fumihito, Terai Hirotaka, Ikuta Rikizo, Yamamoto Takashi	4. 巻 30
2. 論文標題 Entanglement distribution using a biphoton frequency comb compatible with DWDM technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 36711 ~ 36711
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.469344	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ikuta Rikizo	4. 巻 30
2. 論文標題 Wave-particle duality of light appearing in an intensity interferometric scenario	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 46972 ~ 46972
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.474766	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tsujiyama Yoshiaki, Ikuta Rikizo, Wakui Kentaro, Kobayashi Toshiki, Fujiwara Mikio	4. 巻 19
2. 論文標題 Quantum State Tomography of Qudits via Hong-Ou-Mandel Interference	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 14008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.19.014008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wojciech Roga, Rikizo Ikuta, Tomoyuki Horikiri, Masahiro Takeoka	4. 巻 2211.15138
2. 論文標題 Efficient Dicke state generation in a network of lossy channels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2211.15138	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomohiro Yamazaki, Tomoaki Arizono, Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto	4. 巻 2301.0318
2. 論文標題 Linear optical quantum computation with frequency-comb qubits and passive devices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2301.03188	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomohiro Yamazaki, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto	4. 巻 2301.06551
2. 論文標題 Stabilizer formalism in linear optics and application to Bell-state discrimination	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2301.06551	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Rikizo Ikuta, Masayo Yokota, Toshiki Kobayashi, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto	4. 巻 17
2. 論文標題 Optical Frequency Tweezers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 34012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.17.034012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Rintaro Fujimoto, Shoichi Murakami, Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Shigeyuki Miyajima, Masahiro Yabuno, Fumihiro China, Hirotaka Terai, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto	4. 巻 14
2. 論文標題 Entangled photon pair detection by superconducting nanowire single-photon detectors with a single-flux-quantum coincidence circuit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 102001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac211e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikuta Rikizo, Kobayashi Toshiki, Yamazaki Tomohiro, Imoto Nobuyuki, Yamamoto Takashi	4. 巻 103
2. 論文標題 Cavity-enhanced broadband photonic Rabi oscillation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 33709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.033709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 林祥吾, 村上翔一, 小林俊輝, 知名史博, 三木茂人, 寺井弘高, 小玉剛史, 澤谷恒明, 大友昭彦, 下井英樹, 生田力三, 山本俊
2. 発表標題 タンDEM型 type-II 疑似位相整合PPLN 導波路による非縮退光子対生成
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 生田力三
2. 発表標題 光で繋がる量子情報ネットワーク
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 生田力三
2. 発表標題 量子中継最先端
3. 学会等名 2022年度NICT若手チャレンジラボ「量子ICT研究会」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林俊輝, 藤本 倫太郎, 山崎 友裕, 三木 茂人, 知名 史博, 寺井 弘高, 生田 力三, 山本 俊
2. 発表標題 DWDM技術に適した共振器増強パラメトリック下方変換による偏光エンタングル光子対配送
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta, Masayo Yokota, Toshiki Kobayashi, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Optical frequency conversion using a resonator that is pre-resonated only to the desired converted frequency
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta
2. 発表標題 Young Researcher Panel Session in Quantum Cryptography & Communication Track
3. 学会等名 Quantum Innovation 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta
2. 発表標題 Application of PPLN Waveguide Resonators to Quantum Information Processing
3. 学会等名 12th Annual World Congress of Nano Science & Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta
2. 発表標題 Towards an optical-fiber-based quantum internet
3. 学会等名 Symposium on Quantum Sciences - Osaka University & University Hamburg (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 生田力三
2. 発表標題 光周波数ピンセット
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta, Ryoya Tani, Masahiro Ishizaki, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Hiroataka Terai, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 1000-mode frequency multiplexed singly-resonant photon pairs
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村上翔一, 藤本倫太郎, 生田力三, 小林俊輝, 井上飛鳥, 梅木毅伺, 笠原亮一, 向井哲哉, 井元信之, 山本俊
2. 発表標題 量子インターネットのためのファイバ結合型 PPLN 周波数変換器
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 生田力三
2. 発表標題 量子インターネットのための量子周波数変換
3. 学会等名 量子技術ホライゾンー量子物理から量子インターネットを展望する(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤本倫太郎, 村上翔一, 生田力三, 小林俊輝, 三木茂人, 宮嶋茂之, 藪野正裕, 寺井弘高, 井元信之, 山本俊
2. 発表標題 SFQ回路を搭載したSSPDを用いた量子もつれ光子対の測定
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横田 雅世, 生田 力三, 小林 俊輝, 井元 信之, 山本 俊
2. 発表標題 変換光のみ共振器増強したPPLN導波路による差周波発生
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Toshiki Kobayashi, Motoki Asano, Rikizo Ikuta, Sahin K. Ozdemir, Takashi Yamamoto	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer, Singapore	5. 総ページ数 22
3. 書名 Photonic Quantum Interfaces Among Different Physical Systems (Book Chapter)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------